

Virtuelle 3D-Kartenmodelle

JÜRGEN DÖLLNER

1 Einführung

Die wachsende Verbreitung digitaler Bildmedien und ihre Integration in den Alltag werfen u.a. die Frage auf, wie mit diesen Medien adäquat raumbezogene Informationen kommuniziert werden können und wie die dazu erforderlichen Software-Artefakte systematisch aufzubauen sind. Virtuelle 3D-Kartenmodelle unternehmen den Versuch einen Beitrag zur Bewältigung dieser Aufgabe zu liefern. Virtuelle 3D-Kartenmodelle repräsentieren ein Mittel und Werkzeug für die Visualisierung und Kommunikation raumbezogener Informationen auf der Grundlage der Kartenmetapher. Ziel unseres Ansatzes ist es, *eine generische Software-Komponente zur Präsentation, Exploration, Analyse und Editierung raumbezogener Daten und Prozesse für Mensch-Maschine-*

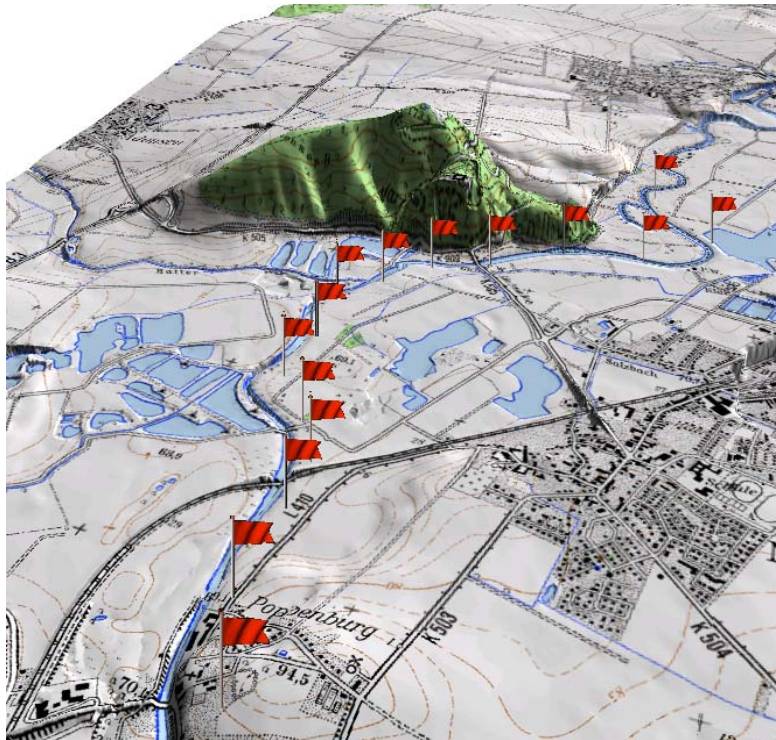


Abb. 1: Beispiel einer 3D-Karte mit topographischer Textur, Gewässer-Textur und Landmarken.

Schnittstellen zu entwickeln. Mögliche Einsatzgebiete einer solchen Komponente umfassen Geo-Informationssysteme, Navigationssysteme, Stadt- und Landschaftsplanungssysteme sowie Web-basierte interaktive Karten.

1.1 Begriff „3D-Karte“

3D-Karten werden nachfolgend als kartenverwandte Darstellungen aufgefasst, die raumbezogene Daten und Prozesse auf der Grundlage eines digitalen Geländemodells dreidimensional computergraphisch visualisieren, die Interaktion mit dem und die Manipulation des Dargestellten ermöglichen und dabei den Kartenaufbau und die Kartengestaltung dynamisch festlegen können. Ein Beispiel einer 3D-Karte ist in Abbildung 1 dargestellt.

Der Begriff *3D-Karte* wurde gewählt, da mit ihm – im heutigen Sprachgebrauch auf dem Gebiet der 3D-Computergraphik und Visualisierung – ein digitales dreidimensionales Kartenmodell und dessen geometrische Projektion auf eine virtuelle 2D-Zeichenfläche verstanden werden. Im eigentlichen Sinn handelt es sich um *virtuelle 3D-Karten*, doch im Kontext digitaler Bildmedien wird auf diesen Zusatz verzichtet.

1.2 Technologische Grundlagen

Technologien auf dem Gebiet der *Virtuellen Realität* (VR) besitzen ein großes Potential für innovative und effektive Informationsvisualisierung, da sie in der Lage sind, unser sensorisches System und unsere kognitiven Stärken anzusprechen (MACEACHREN ET AL. 1999a). Die Kennzeichen *virtueller Umgebungen* sind u.a. die realitätsorientierte Darstellung, die Interaktion zwischen Benutzer und Umgebung, die Immersion des Benutzers in die Umgebung, die Variierung der Informationsintensität und schließlich die Ausstattung von Objekten mit Intelligenz. Virtuelle Umgebungen als Medium für Geovisualisierung konzentrieren sich insbesondere auf eine dynamische und realistische Darstellung von raumbezogenen Sachverhalten und die Interaktion der Nutzer mit diesen Darstellungen. Virtuelle 3D-Kartenmodelle lassen sich als kartenbasierte virtuelle Umgebung begreifen, die neue Formen von Karten und Kartennutzungen ermöglicht, aber i.A. auf Photorealismus zugunsten graphischer Abstraktion verzichten.

Zur technischen Umsetzung virtueller Umgebungen werden Visualisierungs- und 3D-Graphiksysteme eingesetzt. *3D-Graphiksysteme* wie z. B. OpenInventor (STRAUSS & CAREY 1992) oder Java-3D (SOWIZRAL ET AL. 2000) stellen im Allgemeinen Klassenbibliotheken bereit, mit der computergraphische Anwendungen objektorientiert programmiert werden. *Visualisierungssysteme* wie z.B. VTK (SCHROEDER ET AL. 1997) bieten eine auf wissenschaftlich-technische Visualisierung ausgerichtete Funktionalität und zeichnen sich i.A. durch eine Fülle integrierter Visualisierungsverfahren aus. Sowohl bei Graphik- als auch bei Visualisierungsbibliotheken erfolgt die Programmierung von Anwendungen dadurch, dass computergrafische Objekte erzeugt und in Form von Szenengraphen hierarchisch angeordnet werden. Die Objekte können mit geeigneten Callback-Funktionen, die anwendungsspezifische Funktionalität ansprechen, ausgestattet werden. Die Systeme sind jedoch als *general-purpose Systeme* entworfen: Ihre unmittelbare Nutzung zur Konstruktion kartenbasierter virtueller Umgebungen ist daher kaum möglich, denn die zur Verfügung gestellten computergraphischen Komponenten besitzen weder ein passendes Abstraktionsniveau noch effiziente Algorithmen und Datenstrukturen für die speziellen Anforderungen der Geo-Visualisierung. Entwickler von 3D-Karten müssten

somit zunächst mit 3D-Graphikprogrammierung vertraut werden, um fehlende Algorithmen und Datenstrukturen zu ergänzen; dies wird durch die zunehmende Komplexität computergraphischer Verfahren jedoch erschwert.

Alternativ können zur technischen Umsetzung von raumbezogenen virtuellen Umgebungen *3D-Web-Techniken* wie z. B. VRML, X3D (WEB3D CONSORTIUM) und geo-spezifische Erweiterungen wie GeoVRML (REDDY ET AL. 2000) eingesetzt werden. Diese Techniken nutzen jedoch einerseits noch nicht das Potential heutiger computergraphischer Algorithmen und Datenstrukturen, da die Entwicklung dieser Standards meist zeitverzögert von den Entwicklungen im Bereich Computergraphik-Hardware, Computergraphik-Software und geo-spezifischen computergraphischen Verfahren (z. B. dynamische Level-of-Detail-Geländemodellierung oder dynamische Geländetexturierung) erfolgt. Andererseits besitzt die Implementierung des 3D-Kartenmodell-Konzepts hohe Anforderungen in Hinblick auf Datenmenge, Darstellungsgeschwindigkeit, Bildqualität und Interaktion, die nur durch kartenspezifische Erweiterungen erfüllt werden können.

Aus technischer Sicht bietet SVG, das Scalable Vector Graphics Format (EISENBERG 2002), eine geräte- und auflösungsunabhängige Spezifikationssprache für 2D-Graphik, die u.a. zur Spezifikation von 2D-Karten herangezogen wird. Für SVG existieren eine wachsende Zahl von Editoren und webfähige Viewern. Das SVG-Format ist nicht direkt auf 3D-Karten übertragbar, da dort ein 3D-Bezugsmodell vorliegt. Jedoch lassen sich grundsätzlich mit SVG graphische 2D-Abbildungen von Vektor-Daten spezifizieren, die auf das Gelände mittels 2D-Texturen aufgetragen werden könnten.

Mit dem Ziel digitaler Landschaftsmodellierung entwickelte ERVIN (1993) ein Konzept zur objektorientierten Modellierung von Landschaften und implementierte ein 3D-Kartensystem. HÄBERLING (1999) führt die topographische 3D-Karte ein, die als bildhafte Darstellung eines Geländeausschnitts in perspektivischer Schrägansicht mit integrierten topographischen Informationen definiert wird. Als einen wichtigen Aspekt bei der Konstruktion von 3D-Karten wird in diesen Ansätzen die *Vielzahl der Gestaltungs- und Betrachtungsfaktoren* identifiziert, die sich aus der dynamischen 3D-Ansicht ergeben und besonders berücksichtigt werden müssen (MACEACHREN ET AL. 1999b).

Das hier vorgestellte 3D-Kartenmodell-Konzept wurde in Form einer Software-Bibliothek implementiert, die auf OpenGL (WOO ET AL. 1999) als 3D-Graphiksystem basiert und dadurch einen effizienten Zugang zur Computergraphik-Hardware besitzt. Darauf aufbauend wurden 3D-Kartenkomponenten entwickelt, die kartenspezifische Algorithmen und Datenstrukturen enthalten und effiziente, hochqualitative Visualisierung großer Geodatenmengen erlauben.

2 Bauelemente virtueller 3D-Kartenmodelle

Kernbestandteil des vorgestellten Konzepts zu virtuellen 3D-Kartenmodellen bildet eine Sammlung von *3D-Kartenklassen*, die es Entwicklern erlaubt, leistungsfähige visuelle Schnittstellen für raumbezogene Informationen transparent, kompakt und effizient zu konstruieren. Mit dem Begriff *3D-Kartenklasse* wird softwaretechnisch eine Klasse bezeichnet, deren Instanzen zur Konstruktion einer 3D-Karte herangezogen werden können. Mit dem Begriff *Kartenobjekt* wird eine Instanz einer 3D-Kartenklasse bezeichnet. Ein Kartenobjekt kann über einen komplexen Aufbau verfügen (festgelegt durch Attribute und Methoden), andere Kartenobjekte enthalten (Aggregation) und mit anderen Kartenobjekten

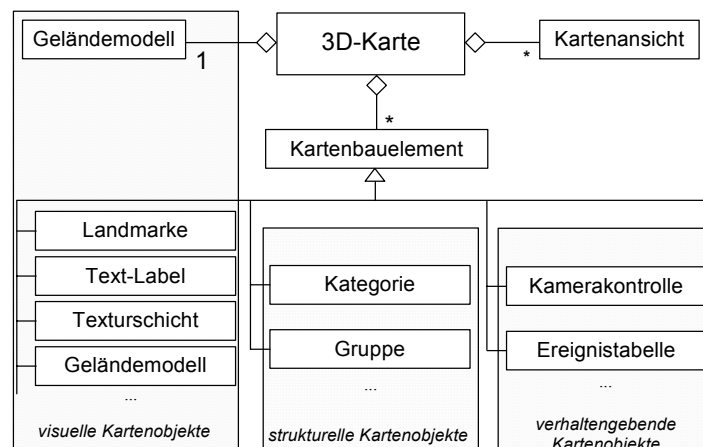


Abb. 2: Objektorientiertes Design des 3D-Kartenkonzepts.

verbunden sein (Assoziation). 3D-Kartenklassen können spezialisiert sein, d.h. von einer existierenden 3D-Kartenklasse wird eine verfeinerte Klasse abgeleitet (Vererbung).

2.1 3D-Kartenmodell

Das konzeptionelle Modell für interaktive 3D-Karten definiert 3D-Kartenklassen für das Kartengeländemodell, die Kartenansicht (2D-Projektion) sowie visuelle, strukturelle und verhaltengabende Kartenobjekte. Abbildung 2 zeigt das zugehörige Klassendiagramm, dargestellt in der Notation der Unified Modeling Language UML (OESTEREICH 2001). Eine konkrete 3D-Karte (in einem Anwendungsprogramm) besteht aus einem Geländemodellobjekt, einem Kartenansichtsobjekt und einer Sammlung von visuellen, strukturellen und verhaltengabenden Kartenobjekten.

Kennzeichnend für das hier vorgestellte 3D-Kartenkonzept ist es, dass es softwaretechnisch einen komponentenbasierten Ansatz verfolgt, d.h. einzelne 3D-Karten werden hauptsächlich durch den Zusammenschluss von *vorgefertigten Kartenbauelementen* konstruiert. Das konzeptionelle Modell erhöht im Vergleich zu anderen Visualisierungsbibliotheken das Abstraktionsniveau bei der Entwicklung von 3D-Karten und ermöglicht insbesondere die Kapselung komplexer computergraphischer Verfahren in „Black-Box“-Komponenten. Abbildung 3 zeigt die konzeptuelle Struktur einer 3D-Karte und die sie konstituierenden Kartenobjekte.

2.2 Visuelle Kartenobjekte

Visuelle Kartenobjekte repräsentieren georeferenzierte geometrische 3D- und 2D-Objekte, die über graphische Attribute, wie z.B. Farbe, Größe, Form und Orientierung, verfügen. Ein spezielles visuelles Kartenobjekt ist das Geländemodell. Im Vergleich zu Primitiven von 3D-Graphiksystemen sind die visuellen Kartenobjekte auf die Bedürfnisse von 3D-Karten

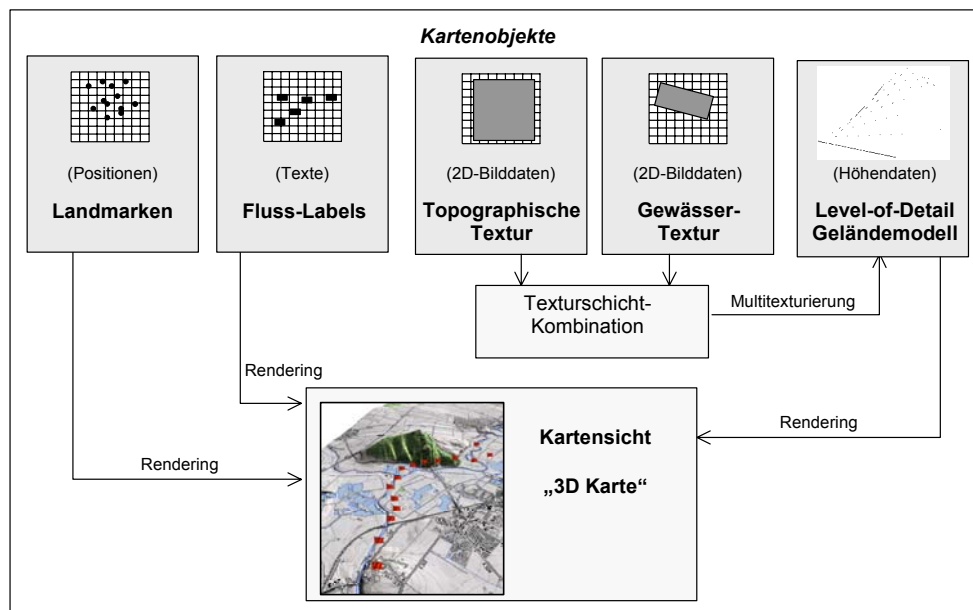


Abb. 3: Beispiel einer 3D-Karte und ihres Aufbaus aus Kartenobjekten.

abgestimmt und weisen eine komplexere Struktur sowie ein komplexeres Verhalten auf. Beispiele hierfür sind Landmarken, Labels und Texturschichten.

- *Landmarken* sind georeferenzierte 2D- oder 3D-Symbole, die z.B. zur Markierung diskreter Geo-Objekte und -Positionen, zum Aufzeigen von Wegen und Richtungen (ELVINS ET AL. 1997) sowie zur Repräsentation thematischer Informationen eingesetzt werden.
- *Labels* sind textuelle Beschreibungen, die mit Geo-Positionen in der 3D-Karte assoziiert werden. Labels werden in der Sichtebeine positioniert und automatisch zum Betrachter ausgerichtet (Billboarding-Technik).
- *Texturschichten* sind Texturen in Form von 2D-Bilddaten, die auf die Geländeoberfläche projiziert werden. Sie können thematische oder topographische Rasterdaten repräsentieren und entweder statisch vorberechnet oder dynamisch generiert werden.

2.3 Geländemodell

Das *Geländemodell* repräsentiert die in einer 3D-Karte vorhandene Geländeoberfläche und kann in GIS-üblichen Formaten spezifiziert sein. Intern wird ein Geländemodell zu einem *Multiresolutionsmodell* umgewandelt. Ein Multiresolutionsmodell stellt für das Rendering (Bildsyntheseprozess) einzelne Geländebereiche in unterschiedlicher geometrischer Auflösung (*Level-of-Detail*) dar. Die Auflösung ist abhängig von der Sichtbarkeit, dem Kameraabstand und der Qualitätsvorgabe. Hierdurch kann die tatsächlich zum Rendering



Abb. 4: Einzelne Texturschichten (links). Simultane Projektion der Texturschichten auf eine 3D-Karte (rechts).

benötigte Zahl von Dreiecken drastisch reduziert werden. Ohne diese Reduktion wäre das Rendering hochauflöster Geländemodelle nicht mit interaktiver Bildwiederholrate möglich (Leistungsbeschränkung der Graphik-Hardware).

Für die 3D-Kartenmodelle wurde ein eigenes Multiresolutionsverfahren entwickelt, das auf Standard-Verfahren (u.a. DE FLORIANI ET AL. 1998, HOPPE 1998, PAJAROLA 1998 oder LINDSTROM & PASCUCI 2001) zurückgreift, diese jedoch erweitert, indem Multiresolutionsmodelle für Geländetexturen integriert werden. Der *Approximation-Tree* (BAUMANN ET AL. 1999) stellt sowohl für Geländegeometrie als auch für Geländetexturen Level-of-Detail-Funktionalität bereit. Im Teilmodell für Geländetexturen wird eine gegebene, beliebig große Geländetextur auflösungsvariant auf Anforderung durch den Renderingalgorithmus berechnet.

Jede Geländetextur kann als *Texturschicht* auf eine Geländeoberfläche projiziert werden. Im Unterschied zu vielen klassischen Verfahren können mehrere Texturschichten simultan auf eine Geländeoberfläche aufgetragen werden. Die Texturschichten können sich beliebig überlappen und müssen nicht notwendigerweise das gesamte Gelände überdecken; ihre Lage wird über Geo-Koordinaten festgelegt. Texturschichten werden miteinander in einer 3D-Kartenansicht durch Bildoperationen kombiniert. Computergraphisch geschieht dies durch Multitexturierung (WOO ET AL. 1999), das Hardware-beschleunigt arbeitet und Texturdaten erst im Bildraum kombiniert. Multitexturierung eröffnet gerade für die Kartgestaltung neue, wesentliche Möglichkeiten, anspruchsvolle 3D-Kartengraphik zu erstellen (DÖLLNER ET AL. 2000). Abbildung 4 (links) zeigt eine Schattierungstextur, eine topographische Textur und eine Highlight-Textur; Abbildung 4 (rechts) zeigt eine 3D-Karte, auf der diese Texturschichten simultan sichtbar sind.

2.4 Strukturelle Kartenobjekte

Strukturelle Kartenobjekte klassifizieren und organisieren Sammlungen von Kartenobjekten und modellieren Beziehungen zwischen ihnen. Kategorien und Gruppen sind grundlegende strukturelle Kartenobjekte.

- *Kategorien* erlauben die Klassifikation von Kartenobjekten, d.h. sie assoziieren Metainformation mit ihnen. Zum Beispiel kann eine thematische Textur, die Daten über den Waldbestand repräsentiert, mit der Kategorie „Wald“ und mit der Kategorie „Landnutzung“ assoziiert werden.
- *Gruppen* ordnen Kartenobjekte in anwendungsspezifische Einheiten. Gruppen können Hierarchien bilden; sie lassen sich ineinander schachteln. Ein Kartenobjekt kann einer oder mehreren Gruppen angehören. So kann zum Beispiel eine Sammlung von Landmarken für einzelne Gebäude-Objekte in einer Gruppe für einen Gebäudeblock zusammengefasst werden.

2.5 Verhaltengebende Kartenobjekte

Verhaltengebende Kartenobjekte können auf Ereignisse und Veränderungen durch den Aufruf von anwendungsspezifischen Aktionen reagieren und definieren dadurch die Interaktivität und Dynamik von 3D-Karten. Um Kartenobjekten ein von ihrer Klasse unabhängiges Verhalten zuordnen zu können, werden verhaltengebende Kartenobjekte als separate Objekte modelliert. Aus diesem Grund wird das anwendungsspezifische Verhalten nicht in den Kartenobjekt-Klassen festgelegt, sondern durch aggregierte verhaltengebende Kartenobjekte modelliert.

- *Ereignistabellen* sind generische verhaltengebende Kartenobjekte, die Ereignisse mit Funktionen (d.h. Callbacks) assoziieren. Ereignisse umfassen Geräteereignisse (z. B. Mausklick oder -bewegung), Zeitereignisse und Statusänderungen von Kartenobjekten (z.B. Sichtbarkeitsänderung von Objekten). Funktionen werden ausgeführt, falls das mit ihnen assoziierte Ereignis eintritt. Funktionen können in Form von Skripten implementiert werden, die durch einen integrierten Interpreter ausgewertet werden. Skriptbasierte Funktionen ermöglichen es dem Entwickler und den Kartenbenutzern insbesondere, 3D-Karten zur Laufzeit mit Verhalten auszustatten und dieses auch zur Laufzeit zu modifizieren – Kompile- und Link-Durchläufe entfallen. Mehrere Kartenobjekte, die nicht notwendig einer gemeinsamen Kartenklasse angehören, können ein gemeinsames Ereignistabellen-Kartenobjekt besitzen; einheitliches Verhalten kann damit klassenübergreifend individuell den Kartenobjekten zugeordnet werden.
- *Constraint-Kartenobjekte* sind eine weitere Kategorie von verhaltengebenden Kartenobjekten, die Parameter von Kartenobjekten einschränken bzw. überwachen. Das *Kameraanimations-Kartenobjekt* zum Beispiel bewegt und orientiert die Kamera entlang eines definierten Pfades durch die 3D-Karte.

2.6 Kartenansichten

Kartenansichten visualisieren 3D-Karten in einem Graphikfenster der Benutzerschnittstelle. Eine Anwendung kann zu einer 3D-Karte eine beliebige Zahl von Kartenansichten erzeugen und unabhängig deren Kameraeinstellungen spezifizieren. Darüber hinaus lässt sich in jeder Kartenansicht die Kartengestaltung individuell festlegen. Zum Beispiel kann in

einer Hauptansicht eine perspektivische Projektion und in einer Überblicksansicht (Metakarte), die die Navigation und Orientierung in der Hauptansicht unterstützt, eine orthogonale Projektion verwendet werden.

3 Dynamik virtueller 3D-Kartenmodelle

Mit Mitteln der animierten und interaktiven Visualisierung lässt sich eine Fülle von Strategien für die effiziente Kommunikation von raumbezogenen Daten entwickeln (CARTWRIGHT ET AL. 1999). Auf dem Gebiet der kartographischen Animation wird beispielsweise das Potential dynamischer Kartenrepräsentationen zur Kommunikation von Geo-Prozessen und Geo-Phänomenen untersucht (BUZIEK ET AL. 2000).

Um animierte und interaktive Visualisierung zu ermöglichen, müssen Kartenobjekte in Echtzeit konfiguriert und modifiziert werden können. Dass Strategien zur animierten, interaktiven Kartengestaltung mittels virtueller 3D-Kartenmodelle kompakt und effizient realisiert werden können, soll an den Beispielen der Level-of-Detail-Darstellung, der Geländetextur-Überblendung und der Texturlinsen belegt werden.

3.1 Level-of-Detail-Gruppen

Die kognitive Belastung für den Benutzer einer 3D-Karte kann durch Anpassung der thematischen Information optimiert werden (MACEACHREN ET AL. 1999b). Insbesondere muss die Darstellung die Benutzerbedürfnisse und die Bildauflösung berücksichtigen. 3D-Karten stellen zur Umsetzung dieses Prinzips *Level-of-Detail-Gruppen* (LOD-Gruppen) bereit.

Eine LOD-Gruppe enthält eine Sammlung von distanzabhängigen, nicht notwendigerweise typgleichen Kartenobjekten, die thematische Informationen in unterschiedlichen Auflösungsstufen abbilden. Für jedes Kartenobjekt in der LOD-Gruppe ist ein Sichtbarkeitsintervall anzugeben, das festlegt, bei welchem Abstand zur Kamera das

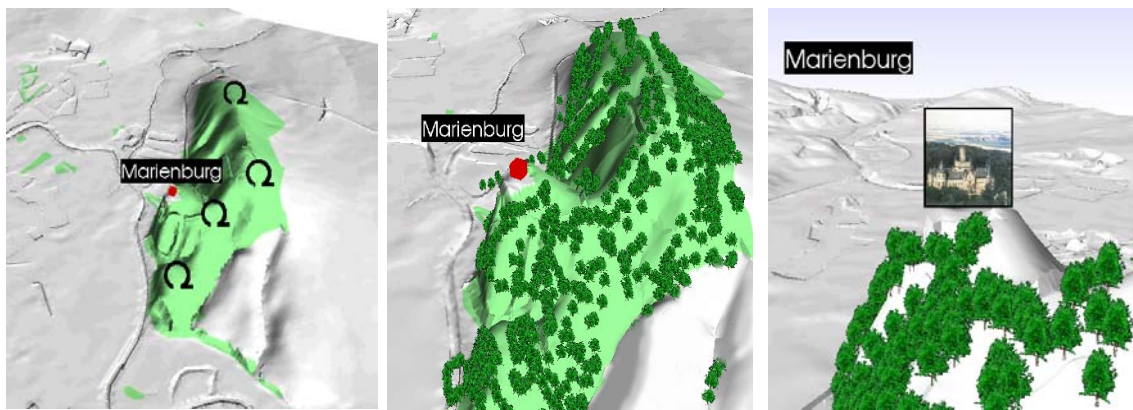


Abb. 5: Level-of-Detail-Kartengestaltung am Beispiel eines Geo-Objektes (Burg) und eines Geo-Feldes (Landnutzung) dargestellt in unterschiedlichen Abständen zur Kamera.

Objekt dargestellt wird. Die Sichtbarkeitsintervalle von Kartenobjekten können sich überlappen, um Übergänge zwischen Auflösungsstufen zu ermöglichen.

Abbildung 5 zeigt eine 3D-Karte mit Geo-Objekten und Geo-Feldern in unterschiedlichen Auflösungsstufen. Das Geo-Objekt „Burg“ ist durch eine Box und durch ein Photo repräsentiert. Das Geo-Feld, ein Landnutzungsdatensatz für die Thematik „Wald“, ist durch abstrakte und konkrete Glyphen visualisiert.

3.2 Geländetexturen-Überblendung

Liegen zu thematischen Informationen Geländetexturen mit unterschiedlicher Auflösung vor, dann können diese in Abhängigkeit von der Kameraentfernung überblendet werden. Die einzelnen Geländetexturen sind im Allgemeinen unterschiedlich kartographisch generalisiert; die Überblendung stellt einen glatten visuellen Übergang sicher.

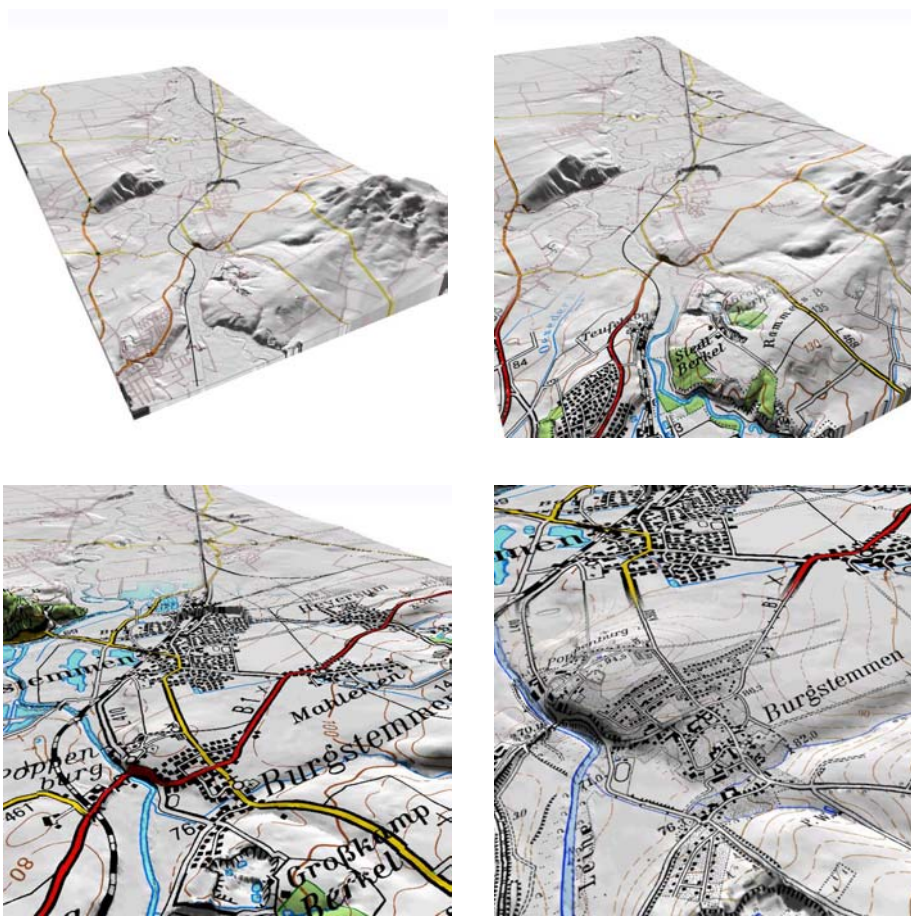


Abb. 6: Überblendung von Geländetexturen unterschiedlicher Informationsintensität in Abhängigkeit von der Kameraentfernung.

Das *Texturüberblendungs-Kartenobjekt* ist eine spezielle Texturschicht, die eine Folge von Texturen und Übergangsintervallen speichert. Abbildung 6 zeigt Überblendungen von Texturschichten unterschiedlicher Informationsintensität in Abhängigkeit von der Entfernung zur Kamera.

Zwei zu überblendende Texturen werden direkt im Bildraum während des Bildaufbaus kombiniert (Multitexturierung); zeitaufwendige Bildoperationen auf den Texturdaten (ausgeführt z.B. in einem Vorverarbeitungsschritt) entfallen somit. Deswegen können sogar hochauflöste Texturen in Echtzeit überblendet werden.

Die gleiche Technik kann zur Animation von Texturen eingesetzt werden. Die einzelnen Texturen einer Texturfolge repräsentieren den Texturzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt; durch die fortschreitende Überblendung zwischen jeweils zwei benachbarten Texturen entsteht die Animation (DÖLLNER ET AL. 2000).

3.3 Texturlinsen

Texturlinsen sind spezialisierte Texturschichten, die die Sichtbarkeit und Kombination von thematischen Texturschichten in einer 3D-Karte modifizieren. Auf diese Weise können Informationen in 3D-Kartenansichten dynamisch fokussiert und beschränkt werden.

- Eine *Filter-Texturlinse* beschränkt die Sichtbarkeit anderer thematischer Texturschichten. Sie kann zur Modifikation der visuellen Repräsentation verwendet werden, z.B. indem thematische Daten aus einer bestimmten Texturschicht innerhalb der Linse aus- bzw. eingeblendet werden (Abbildung 7 links).
- Eine *Luminanz-Texturlinse* modifiziert die Helligkeit einer anderen thematischen Texturschicht (Abbildung 7 rechts). Durch die Animation einer Luminanz-Texturlinse können Anwender durch 3D-Karten geleitet werden (z.B. zur Wegbeschreibung).

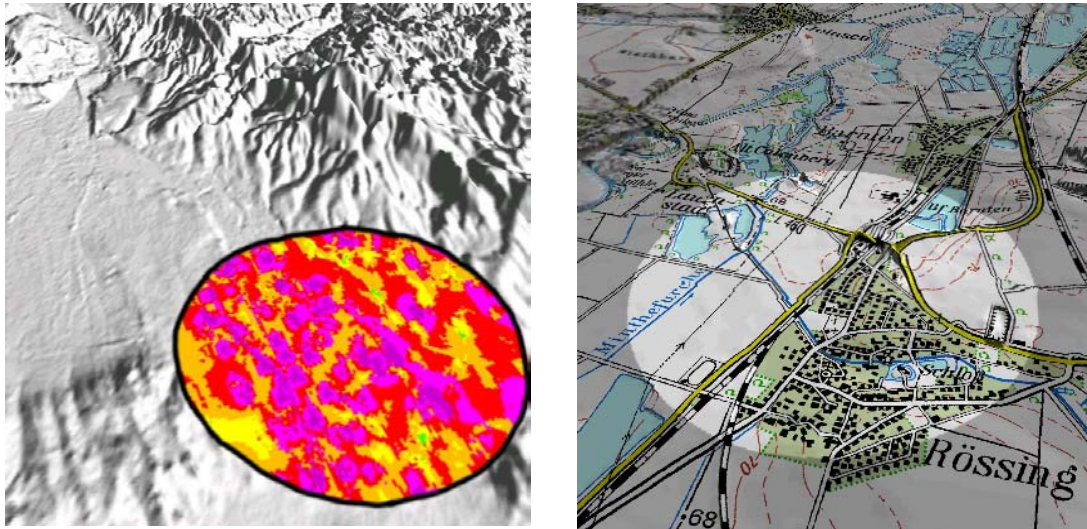


Abb. 7: Interaktive Analyse von Senderstärken mit einer Filter-Texturlinse (links). Aufhellung von Bereichen besonderen Interesses mittels Luminanz-Texturlinse (rechts).

Texturlinsen erlauben es, Informationen in der Kartenansicht genau dort zu visualisieren, wo sie vom Benutzer benötigt werden, d.h. das Bild der 3D-Karte enthält oder fokussiert nur die graphischen Elemente, die im momentanen Kontext von Bedeutung sind. Dadurch lässt sich die Komplexität des Karteninhalts reduzieren.

4.0 Fazit und Perspektiven

Als Werkzeug für die Präsentation, Exploration, Analyse und Editierung raumbezogener Daten und Prozesse zeichnen sich die vorgestellten 3D-Kartenmodelle durch ihre computergraphische Effizienz und Qualität, ihr hohes Maß an Konfigurierbarkeit und Individualisierbarkeit aus. Die eingesetzten computergraphischen Verfahren zur Multiresolutionsmodellierung von Geländegeometrie und Geländetexturen bieten Gestaltungsfunktionalität für komplexe und dynamische Karteninhalte.

3D-Kartenklassen erlauben es, nutzerspezifische virtuelle 3D-Kartenmodelle systematisch und effizient zu erstellen. Hierdurch wird deutlich das Abstraktionsniveau bei der Software-Entwicklung für Geovisualisierung erhöht. Die Herstellungs- und Entwicklungskosten interaktiver 3D-Karten-Anwendungen werden dadurch reduziert.

Anwendungen des Konzepts finden sich in allen Gebieten der interaktiven, raumbezogenen Informationsvisualisierung; virtuelle 3D-Kartenmodelle lassen sich z. B. in Geoinformationssystemen, in Navigationssystemen oder in Anwendungsprogrammen als Benutzungsschnittstellenkomponente einsetzen.

Die vorgestellten virtuellen 3D-Kartenmodell bilden die theoretische Grundlage für das 3D-Kartensystem *LandExplorer* (www.landex.de). Dieses System ermöglicht die Konstruktion, die Nutzung und die Verbreitung von 3D-Karten. Es steht als Anwendungsprogramm, Visualisierungsbibliothek und Komponente zur Verfügung.

Danksagung

Ich danke meiner Arbeitsgruppe, insbesondere Konstantin Baumann und Oliver Kersting, für die Mitentwicklung und Implementierung des LandExplorer-Projekts am Hasso-Plattner-Institut.

Literatur

- K. BAUMANN, J. DÖLLNER, K. HINRICHS, O. KERSTING (1999): A Hybrid, Hierarchial Data Structure for Real-Time Terrain Visualization. *Computer Graphics International CGI '99*, S. 85-92.
- G. BUZIEK, D. DRANSCH, W.-D. RASE (2000): *Dynamische Visualisierung. Grundlagen und Anwendungsbeispiele für kartographische Animationen*, Springer Verlag.
- W. CARTWRIGHT, M.P. PETERSON, G. GARTNER (1999): *Multimedia Cartography*, Springer Verlag.
- J. DÖLLNER, K. BAUMANN, K. HINRICHS (2000): Texturing Techniques for Terrain Visualization. *Proceedings IEEE Visualization 2000*, S. 227-234.
- L. DE FLORIANI, P. MAGILLO, E. PUPPO (1998): Efficient Implementation of Multi-Triangulations. *Proceedings Visualization '98*, S. 43-50.

- J. D. EISENBERG (2002). *SVG Essentials*. O'Reilly.
- T. ELVINS, D. NADEAU, D. KIRSH (1997): Worldlets - 3D Thumbnails for Wayfinding in Virtual Environments. *Proceedings of UIST 97*, S. 21-30.
- S. ERVIN (1993): Landscape Visualization with Emaps. *IEEE Computer Graphics & Applications*, S. 28-33.
- C. HÄBERLING (1999): Symbolization in Topographic 3D Maps: Conceptual Aspects for User-Oriented Design. *19th International Cartographic Conference*, S. 1037-1044.
- H. HOPPE (1998): Smooth View-Dependent Level-of-Detail Control and its Application to Terrain Rendering. *Proceedings IEEE Visualization '98*, S. 35-42.
- P. LINDSTROM, V. PASCUCCI (2001): Visualization of Large Terrains Made Easy. *Proceedings IEEE Visualization 2001*, S. 363-370.
- A.M. MACÉACHREN, R. EDSALL, D. HAUG, R. BAXTER, G. OTTO, R. MASTERS, S. FUHRMANN, L. QIAN (1999a): Exploring the Potential of Virtual Environments for Geographic Visualization. *Association of American Geographers*.
- A.M. MACÉACHREN, M.J. KRAAK, E. VERBREE (1999b): Cartographic Issues in the Design and Application of Geospatial Virtual Environments. *19th International Cartographic Conference*, S. 657-665.
- B. OESTEREICH (2001): *Objektorientierte Softwareentwicklung. Analyse und Design mit der Unified Modeling Language*. 5. Auflage, Oldenbourg.
- R. PAJAROLA (1998): Large Scale Terrain Visualization Using the Restricted Quadtree Triangulation. *Proceedings Visualization '98*, S. 19-26.
- M. REDDY, L. IVERSON, Y.G. LECLERC (2000): Under the Hood of GeoVRML1.0. *Proceedings of the Fifth Web3D/VRML Symposium*.
- W. SCHROEDER, K. MARTIN, B. LORENSSEN (1997): *The Visualization Toolkit. An Object-Oriented Approach to 3D Graphics*. Prentice Hall.
- H. SOWIZRAL, K. RUSHFORTH, M. DEERING (2000): *The Java 3D API Specification*. 2nd Edition, Addison-Wesley.
- P. STRAUSS, R. CAREY (1992): An Object-Oriented 3D Graphics Toolkit. *Computer Graphics (SIGGRAPH '92)*, S. 341-449.
- A. TERRIBILINI (1999): Maps in transition: development of interactive vector-based topographic 3D-maps. *19th International Cartographic Conference*, S. 993-1001.
- WEB3D CONSORTIUM, <http://www.web3d.org/x3d.html>.
- M. WOO, J. NEIDER, T. DAVIS, D. SHREINER (1999): *OpenGL Programming Guide - 3rd edition*. Addison-Wesley.